



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO
OFF-GRID PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA
ESCOLA JATOBAZINHO, PANTANAL SUL-MATO-
GROSSENSE**

Henry Hudson Oliveira Fonseca

Campo Grande - MS

10 de dezembro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO
OFF-GRID PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA
ESCOLA JATOBAZINHO, PANTANAL SUL-MATO-
GROSSENSE**

Henry Hudson Oliveira Fonseca

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência para obtenção
do grau de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Professor Dr. Ruben Barros Godoy

Campo Grande - MS

10 de dezembro de 2024

PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ESCOLA JATOBAZINHO, PANTANAL SUL-MATO- GROSSENSE

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruben Barros Godoy

Orientador

Prof. Dr. Tiago Henrique de Abreu Mateus

Me. Ricardo Batista da Rosa Júnior

Me. Guilherme Anderson de Bragança Fernandes

Campo Grande - MS

10 de dezembro de 2024

DECLARAÇÃO DE AUTORIA

Eu, **Henry Hudson Oliveira Fonseca**, portador do Registro Geral Acadêmico (RGA) 2020.2103.034-0 e do CPF 052.479.481-22, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, elaborado no formato de artigo, será publicado na Revista Eletrônica do Programa de Educação Tutorial com o título **PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ESCOLA JATOBAZINHO, PANTANAL SUL-MATO-GROSSENSE.**

Reconheço e declaro que os seguintes colaboradores são coautores do referido artigo:

Professor Ruben Barros Godoy, orientador do trabalho;

Hyan Gonçalves de Araujo, petiano;

Professor Tiago Henrique de Abreu Mateus.

Campo Grande, 10 de dezembro de 2024.

RESUMO: O presente estudo avalia a ampliação de um sistema fotovoltaico off-grid na Escola Jatobazinho, localizada no Pantanal Sul-Mato-Grossense. Frente à insuficiência do sistema atual para atender à demanda energética, quatro cenários hipotéticos foram analisados, incluindo aumento de carga, ampliação da usina fotovoltaica, substituição de inversores e incremento no banco de baterias. Os resultados destacam o impacto de cada intervenção no balanço energético e no desempenho do banco de baterias, identificando soluções que caminham em direção à autossuficiência energética. Como perspectiva futura, propõe-se a adoção de sistemas off-grid distribuídos para aumentar a resiliência e eficiência do abastecimento energético.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Fotovoltaica; Sistemas Off-grid; Ampliação Fotovoltaica; Sustentabilidade Energética; Pantanal.

PROPOSAL FOR THE EXPANSION OF AN OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR ENERGY SELF-SUFFICIENCY AT ESCOLA JATOBAZINHO, PANTANAL SUL-MATO-GROSSENSE

ABSTRACT: This study examines the expansion of an off-grid photovoltaic system at Escola Jatobazinho in Brazil's Pantanal region. Given the current system's inability to meet energy demands, four scenarios were analyzed: load increase, photovoltaic system expansion, inverter replacement, and battery bank enhancement. The results highlight each intervention's effects on energy balance and battery performance, identifying strategies for achieving energy self-sufficiency. Future efforts propose adopting distributed off-grid systems to improve energy resilience and efficiency.

KEYWORDS: Photovoltaics, Off-grid Systems, Photovoltaic Expansion, Energy Sustainability, Pantanal.

INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas de energia solar fotovoltaica (PV) off-grid vem crescendo globalmente nos últimos 20 anos, impulsionada principalmente pela necessidade de eletricidade confiável e de baixo custo em regiões isoladas. Em um estudo conduzido no Irã, Khatami, Mortazavi, Mashhadi e Oloomi (2013) projetaram um sistema solar off-grid para uma residência padrão de 120 m², capaz de sustentar a carga diária de 6748 Wh por até quatro dias. Em outro estudo, Hassan, Orabi, Ismeil e Alshreef (2019) desenvolveram um guia prático para o dimensionamento de sistemas off-grid em Aswan, Egito, voltado para a alimentação de eletrodomésticos. As Figuras 1 e 2 ilustram a configuração padrão de sistemas fotovoltaicos off-grid. De um modo geral, tais sistemas são compostos por painéis fotovoltaicos que fornecem energia durante o dia e armazenam o excedente em baterias de ciclo profundo para operação isolada da rede elétrica durante períodos prolongados de ausência da luz solar.

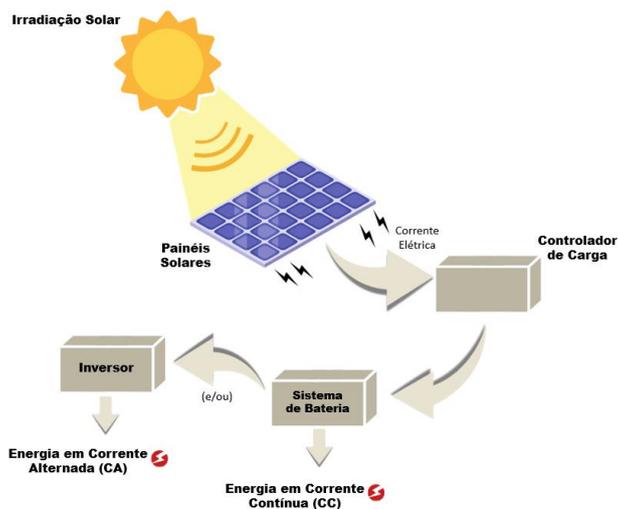


Figura 1: Esquema de todos os componentes para geração de energia solar.
Fonte: Adaptado de Khatami et al., 2013.

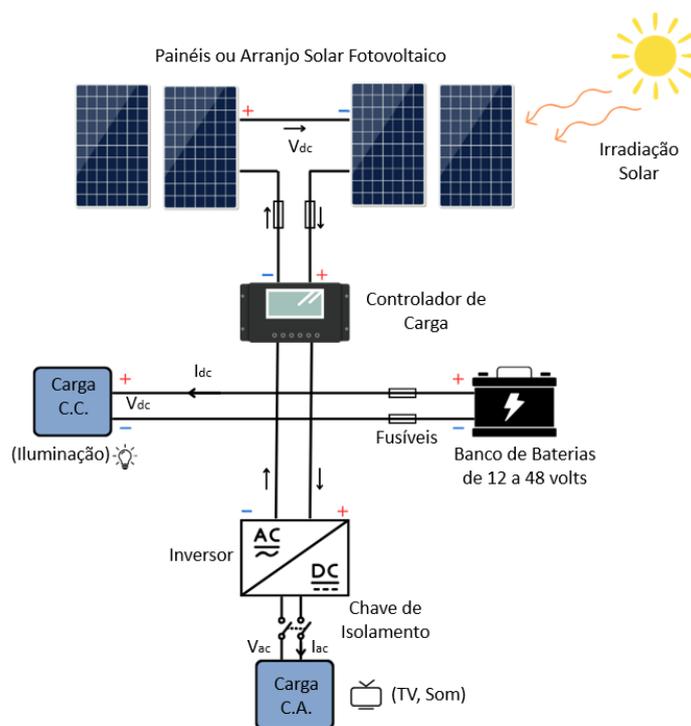


Figura 2: Diagrama de um sistema solar off-grid.
Fonte: Adaptado de Hassan et al., 2019.

Jogunuri, Kumar e Kumar (2017) também analisaram a viabilidade desses sistemas na Índia, em locais onde a cobertura de rede é mínima. Em seu estudo de caso, projetaram um sistema fotovoltaico para o Colégio de Engenharia e Tecnologia Agrícola, em Godhra, com capacidade para atender a demanda diária de 31,30 kWh, utilizando um conjunto de 46 módulos PV e 16 baterias, o que evidencia a viabilidade técnica e o potencial de aplicação de sistemas solares off-grid em locais remotos.

Apesar das vantagens dos sistemas PV off-grid, sua sustentabilidade ainda enfrenta desafios. Frame, Tembo, Dolan, Strachan e Ault et al. (2011) destacam que, para que esses

sistemas sejam eficazes em longo prazo, é fundamental alinhar o desenvolvimento tecnológico com as necessidades sociais, econômicas, institucionais e ambientais das comunidades. Conforme Figura 3, eles apontam para cinco pilares de sustentabilidade: técnica, econômica, institucional, ambiental e social, que precisam ser considerados no desenvolvimento de soluções energéticas em regiões carentes.

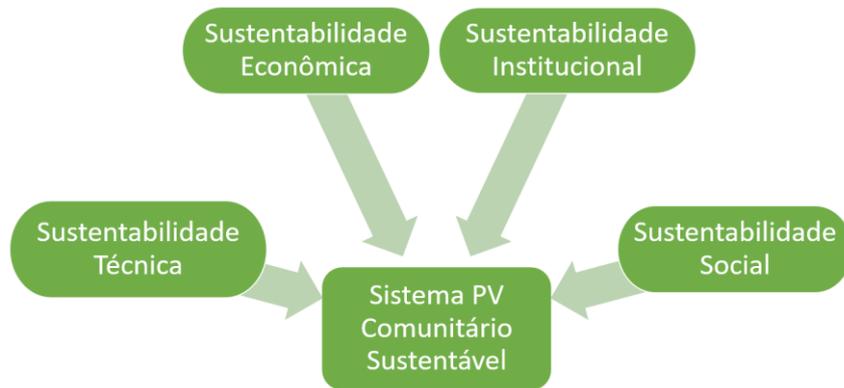


Figura 3: Sistema fotovoltaico comunitário sustentável.
Fonte: Adaptado de Frame et al., 2011.

Um exemplo prático desse desafio foi apresentado por Akinsipe, Moya e Kaparaju (2021), que analisaram a viabilidade de um sistema off-grid para residências em Jos, Nigéria. Por meio de modelagem matemática, demonstraram que o sistema é viável tanto técnica quanto economicamente, e que a solução pode ser um modelo aplicável em outras realidades semelhantes, contribuindo para o desenvolvimento sustentável local. A Figura 4 mostra o diagrama das etapas dessa análise.

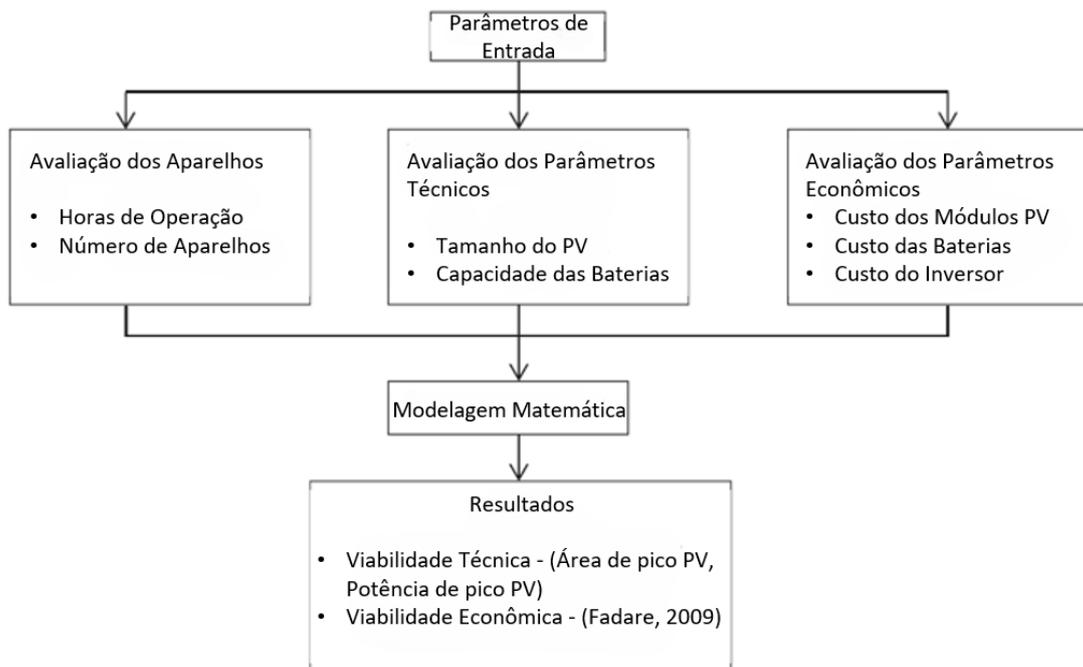


Figura 4: Passos dados na análise técnico-econômica dos sistemas solares fotovoltaicos.
Fonte: Adaptado de Akinsipe et al., 2011.

Diante desse contexto, este trabalho propõe o estudo do levantamento de carga, viabilidade técnica e expansão de um sistema de energia solar off-grid para uma escola que atende comunidades ribeirinhas no Pantanal Sul-mato-grossense, Brasil. Para garantir a confiabilidade do sistema em condições adversas, a análise foi baseada nos dados de insolação do mês com menor incidência solar, obtidos pelo site SOLARGIS.

ESCOLA JATOBATZINHO

Localizada no coração do Pantanal Sul-Mato-Grossense, a Escola Jatobazinho desempenha um papel essencial na oferta de educação para as comunidades ribeirinhas isoladas. Operando em uma das regiões mais remotas e biodiversas do Brasil, a escola atende crianças cujas famílias vivem às margens dos rios e em áreas de difícil acesso, onde o transporte e os serviços públicos são limitados.

Com foco em educação integral, a Escola Jatobazinho oferece não apenas ensino básico, mas também abriga os alunos durante o período letivo, fornecendo alimentação, segurança e atividades extracurriculares. Essa abordagem permite que as crianças tenham acesso a uma educação de qualidade sem que a distância geográfica ou as limitações econômicas sejam obstáculos.

A localização da escola, no entanto, apresenta desafios significativos para a infraestrutura energética. A ausência de acesso à rede elétrica convencional torna imprescindível o uso de soluções alternativas e sustentáveis, como sistemas de energia solar off-grid. Essas soluções são fundamentais para prover o funcionamento contínuo de equipamentos pedagógicos, iluminação, refrigeração de alimentos e água potável, além de promover a redução de impactos ambientais em uma área ecologicamente sensível.

Implementar e expandir sistemas de energia solar no local é uma ação estratégica que contribui para a sustentabilidade da escola, reduz custos operacionais e reforça o compromisso com o meio ambiente.

METODOLOGIA

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid envolve diversas etapas críticas que proporcionam o fornecimento contínuo de energia, mesmo em cenários de baixa irradiação solar. Nesta seção, detalha-se a metodologia adotada, abordando desde o levantamento da demanda energética até a escolha de componentes específicos.

a. Consumo diário de energia

O primeiro passo para se dimensionar um sistema off-grid é a determinação do consumo médio diário de energia ($E_{consumo}$). Este valor pode ser obtido a partir da medição direta com aparelhos adequados. O uso de um analisador de energia é recomendado, afinal, permite a obtenção de dados precisos sobre a curva de demanda, refletindo variações de carga ao longo

do dia e fornecendo uma representação fiel do consumo real. Este detalhe é particularmente relevante, pois oscilações de carga podem impactar diretamente o desempenho e a longevidade das baterias e dos demais componentes do sistema.

No caso em estudo, a medição da potência demanda (P) foi feita em intervalos de 2 minutos por um período total de 20,5 horas. Problemas na alimentação do medidor ocasionaram a perda de 3,5 horas de dados. Para preencher esse intervalo, optou-se por replicar o comportamento da demanda com base nos ciclos de maior potência. Dessa forma, foram consideradas 720 medições durante as 24 horas diárias e os valores obtidos podem ser observados na Figura 5.

Referente à Figura 5, vale ressaltar que o padrão de consumo observado à noite está relacionado à iluminação externa e ao funcionamento do condensador da câmara fria, que opera automaticamente em intervalos regulares para manter a temperatura ideal e conservar os alimentos. Durante o dia, com o início das atividades escolares às 8h, há um aumento significativo na demanda de energia. Finalmente, por volta das 19h, ocorre uma redução no consumo que está associada ao horário de descanso da comunidade.

Pela equação (1) é possível determinar a energia total consumida por dia, onde n o número do intervalo da respectiva medição e T o equivalente a $\frac{1}{30}$ de hora (dois minutos).

$$E_{consumo} = \sum_{i=1}^n \int_{T_i}^{T_{i+1}} P_i * dt \quad (1)$$

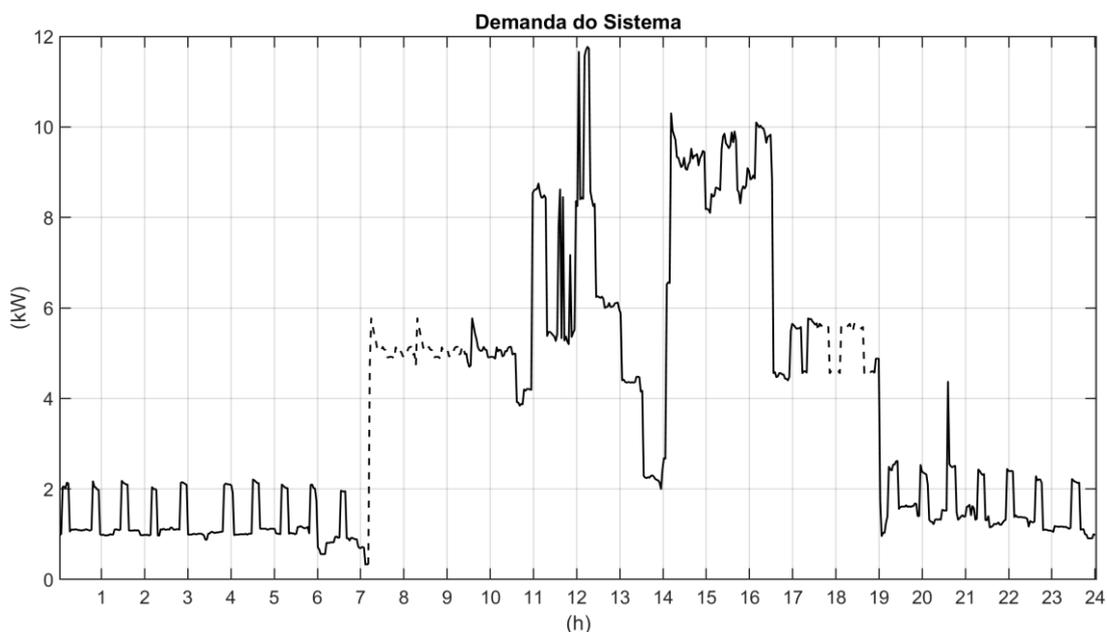


Figura 5: Curva de demanda.

Fonte: Autor.

b. Irradiação solar diária média por mês

Para o correto dimensionamento, é essencial considerar a irradiação solar diária média de cada mês. Para este estudo, adotou-se o valor referente ao mês de junho, por ser o período em que se observa o valor mínimo de irradiação solar (G_{min}). Essa abordagem foi adotada para

evitar que o sistema fosse subdimensionado. Em outras palavras, o uso de G_{\min} como parâmetro para o projeto reflete a premissa de realizar um projeto para o pior cenário, garantindo que, mesmo nas condições menos favoráveis, o sistema atenda à demanda energética solicitada.

Vale ressaltar que a coleta de dados de irradiação pode ser feita com base em medições locais ou por meio de bases de dados meteorológicos confiáveis, como as fornecidas pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) ou outras instituições regionais especializadas.

c. Energia do sistema solar

A energia produzida pelos painéis solares ($E_{\text{geração}}$) foi obtida através dos dados de geração do mês de junho. Como os dados fornecidos são de energia produzida em intervalos de uma hora, considerou-se uma potência média constante para cada respectivo intervalo. Tomou-se o devido cuidado de interpolar os intervalos com 30 pontos por hora, permitindo assim comparar diretamente, intervalo a intervalo, a energia gerada e com a consumida. De maneira análoga à equação (1), a energia gerada em cada intervalo de tempo pode ser calculada através do valor da potência gerada (G) em cada instante conforme equação (2).

$$E_{\text{geração}} = \sum_{i=1}^n \int_{T_i}^{T_{i+1}} G_i * dt \quad (2)$$

d. Energia líquida do sistema

Determinou-se como energia líquida do sistema ($E_{\text{líquida}}$), a subtração, ponto a ponto, dos valores de energia gerada e consumida (equação (3)). O resultado dessa subtração identifica os instantes de sobra energética, cujo valor poderá ser absorvido por um banco de baterias, ou, de insuficiência energética, situação essa em que o banco de baterias deverá suprir a energia das cargas locais.

$$E(t)_{\text{líquida}} = E(t)_{\text{geração}} - E(t)_{\text{consumo}} \quad (3)$$

e. Energia do banco de baterias

O dimensionamento do banco de baterias é uma etapa crítica, pois define a autonomia do sistema. A energia necessária para o armazenamento (E_{bateria}) é calculada levando em conta a profundidade de descarga permitida (η_{descarga}). A profundidade de descarga representa o percentual máximo de descarga recomendado para as baterias sem comprometer sua vida útil.

Uma profundidade de descarga segura para baterias de íon-lítio é de até 80%. A escolha do tipo de bateria influencia não apenas a capacidade necessária, mas também a viabilidade econômica e a manutenção do sistema (Asian Development Bank, 2018).

Dessa forma, o dimensionamento do banco foi realizado com base na energia líquida do sistema. Quando esse balanço apresenta um valor positivo, adota-se o status das baterias como carregando e, quando o valor apresentado é negativo, adota-se como descarregando. A análise gráfica desse comportamento mostra o percentual de carregamento ao longo do dia, assim como a profundidade de descarga do banco.

Para avaliar a autonomia do sistema, procurou-se fechar o ciclo de carga e descarga, considerando nesse processo o SoC (*state of charge* – estado de carga) inicial para um novo dia

como sendo o SoC final do dia anterior. Por se tratar de uma ampliação, o número de células de baterias acrescentadas seguiu o padrão de instalação do banco já existente.

f. Capacidade do sistema fotovoltaico

A potência total do sistema fotovoltaico (P_{real}) foi determinada com base na energia diária necessária para atender à demanda energética total do sistema. Sendo assim, os principais pontos neste dimensionamento consistem em dimensionar um número de placas capaz de suprir energia às cargas e gerar excedente armazenável que viabilize a manutenção energética durante os períodos de ausência ou de insuficiência da irradiação solar.

g. Quantidade de Painéis

A escolha dos painéis fotovoltaicos deve levar em consideração fatores como a eficiência, o coeficiente de temperatura, e a durabilidade dos módulos para assegurar que o sistema tenha o melhor desempenho possível ao longo de sua vida útil.

A usina solar existente conta com módulos já instalados. Com o intuito de manter a padronização e melhor compatibilidade do sistema de geração, preferiu-se utilizar módulos idênticos aos existentes para o projeto de ampliação.

A escolha de módulos idênticos aos instalados tem vantagens técnicas e financeiras que justificam a seleção. Usar módulos de potência semelhante facilita o balanceamento das *strings*, reduz perdas por desbalanceamento elétrico, melhora a compatibilidade com o inversor e maximiza o aproveitamento dos componentes já instalados, como inversores, cabos e proteções. Assim, conforme se observa na equação (4), a quantidade de painéis (Q_{painel}) é obtida dividindo-se a potência real pela potência nominal de cada painel ($P_{unidade}$).

$$Q_{painel} = \frac{P_{real}}{P_{unidade}} \quad (4)$$

h. Escolha dos inversores

A seleção dos inversores foi baseada na capacidade total do sistema (P_{real}) e na configuração das *strings* formadas pelos módulos fotovoltaicos. Em outras palavras, é fundamental levantar as características nominais de entrada e de saída de um inversor para se certificar que o mesmo atenderá o pico de demanda da instalação. A configuração das *strings* de alimentação está sujeita às informações do fabricante, devendo-se respeitar o número máximo de módulos em série e em paralelo a fim de se preservar os limites de tensão e de corrente na entrada do conversor. Outras características técnicas também são importantes, tais como, configurações de tensão de saída, regulação de tensão, fator de potência, rendimento, comunicação e telemetria.

SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR OFF-GRID EXISTENTE

O abastecimento energético da escola é feito através de uma usina de geração fotovoltaica, um banco de baterias, além de dois geradores a combustão que, em teoria,

deveriam ser utilizados somente para situações emergenciais, consequentes de eventual insuficiência do sistema de geração fotovoltaica.

O conjunto off-grid atual contém 6 inversores de 3 kW (SPF 3000TL LVM-ES). Os inversores são conectados dois a dois em paralelo, totalizando 6 kW por conjunto. Desta forma, cada conjunto de dois inversores compõe uma fase e, o arranjo dessas fases na configuração estrela, resulta num sistema trifásico de 220 V. A geração fotovoltaica é realizada por um conjunto de 48 painéis de 400 Wp, resultando numa instalação total de 19,2 kWp. O diagrama geral do sistema fotovoltaico está ilustrado na Figura 6.

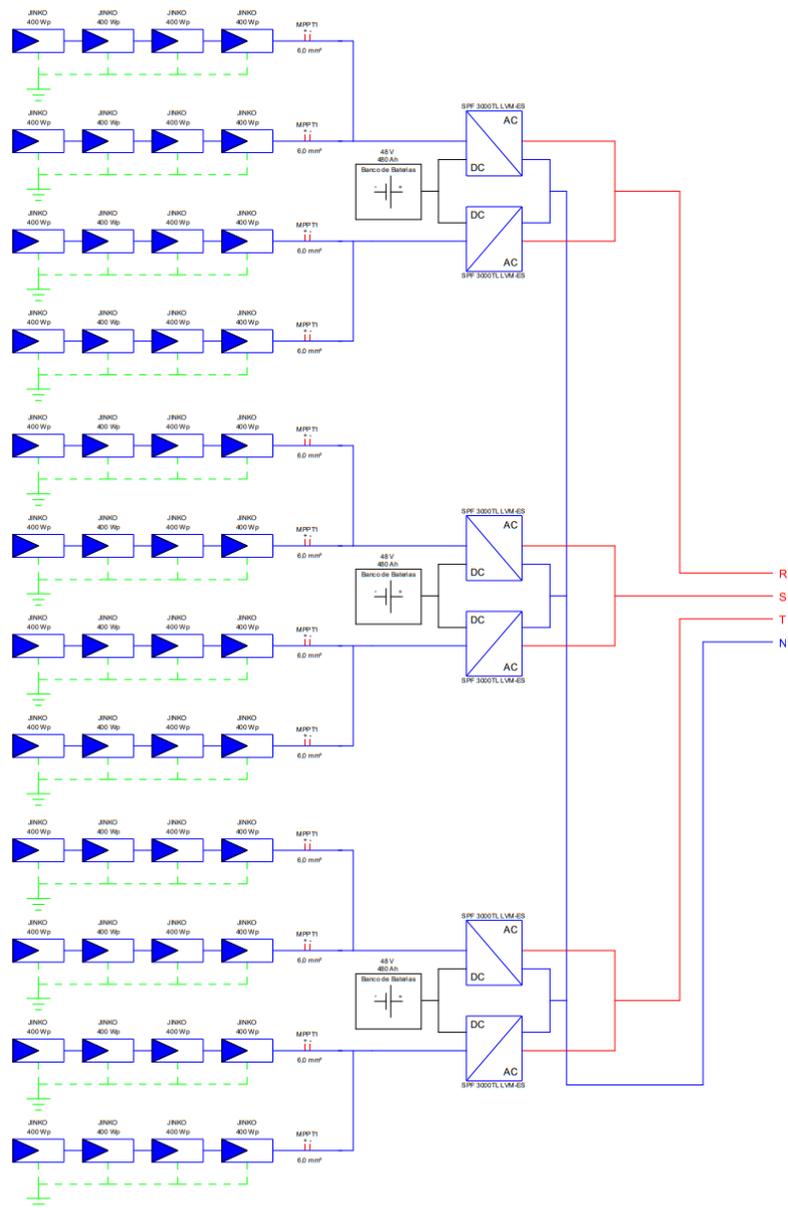


Figura 6: Diagrama geral do sistema PV.
Fonte: Autor.

O banco de baterias está organizado da seguinte forma: cada fase é suprida a partir de 8 baterias, arranjadas conforme a Figura 6. Cada bateria possui tensão nominal de 24 V e capacidade de 120 Ah. Considerando que essa configuração se replica para outras duas fases, o arranjo total, de 24 baterias, permite o armazenamento de até 69,12 kWh de energia.

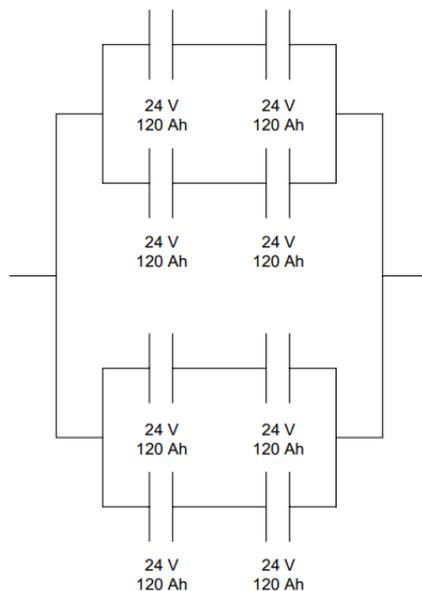


Figura 7: Diagrama banco de baterias por fase.

Fonte: Autor.

A integração da curva de demanda (vide Figura 5) resulta no consumo energético ao longo do dia (Figura 8). Com isso, chega-se ao valor total de energia consumida diariamente: 89,10 kWh. Esse valor é essencial para dimensionar o sistema fotovoltaico, sendo o primeiro passo para avaliar se a capacidade instalada atualmente é adequada para atender à necessidade energética da escola. Com intuito de alcançar autossuficiência energética, esse valor também fornece uma referência para melhorias no sistema, tais como, o aumento da geração fotovoltaica e a necessidade ou não da expansão do banco de baterias.

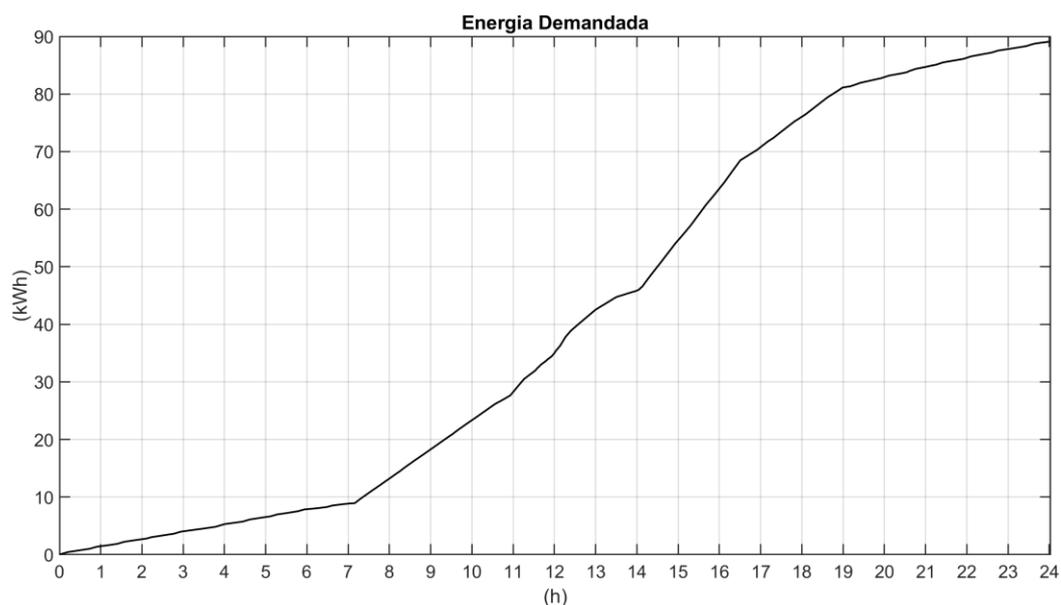


Figura 8: Energia demandada ao longo de um dia.
Fonte: Autor.

Os dados relacionados à geração fotovoltaica da usina da Escola Jatobazinho foram então analisados. Para isso, utilizou-se o *Atlas Solar Global* da SOLARGIS, disponibilizado por meio de contrato com o *The World Bank Group*. Esse banco de dados abrangente, mantido pela instituição, forneceu informações detalhadas sobre os recursos solares na região. A ferramenta revelou-se essencial para obter estatísticas precisas sobre o desempenho da usina instalada, além de oferecer uma visão clara do potencial de geração de energia na área. De acordo com os dados analisados, a curva de geração média para o mês de junho – identificado como o período de menor desempenho anual – registra um pico máximo de geração de 11,19 kWp. Esse comportamento está representado de forma clara na Figura 9, que ilustra o padrão de geração fotovoltaica para o referido mês.

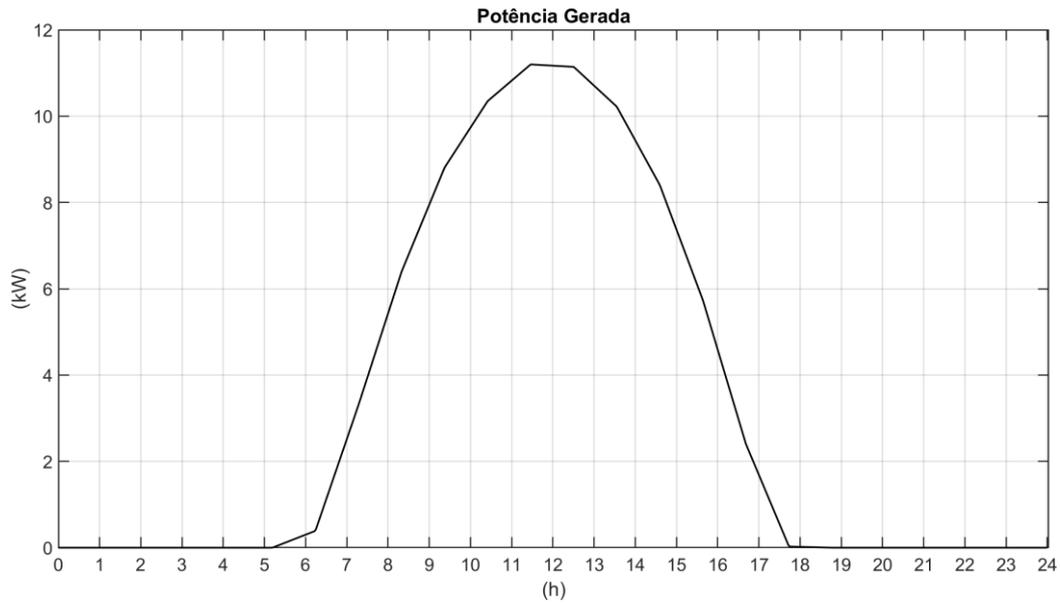


Figura 9: Curva de geração média para o mês de junho.

Fonte: Autor.

Durante o período diurno, a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos é prioritariamente destinada ao atendimento das cargas essenciais da escola, incluindo iluminação, operação de equipamentos eletrônicos e manutenção da câmara fria. O excedente de geração, produzido durante os períodos de pico de irradiância solar, é armazenado em um sistema de baterias estacionárias. Esse armazenamento permite suprir a demanda energética durante os períodos de baixa ou inexistente geração fotovoltaica, assegurando a operação contínua das instalações e garantindo maior autonomia energética ao sistema. A Figura 10 apresenta a energia total gerada diariamente, conforme a curva de geração fotovoltaica simulada, indicando uma produção média diária de 81,67 kWh. Esse valor reflete o potencial energético do sistema em operação sob as condições climáticas da região analisada.

A simples comparação da energia diária gerada pelos painéis (81,67 kWh) com a energia diária necessária para suprir a demanda da escola (89,10 kWh) não é suficiente para se concluir sobre a viabilidade do sistema off-grid implementado. Antes de tudo, é fundamental analisar instantaneamente o balanço energético entre energia fotovoltaica gerada e energia demandada.

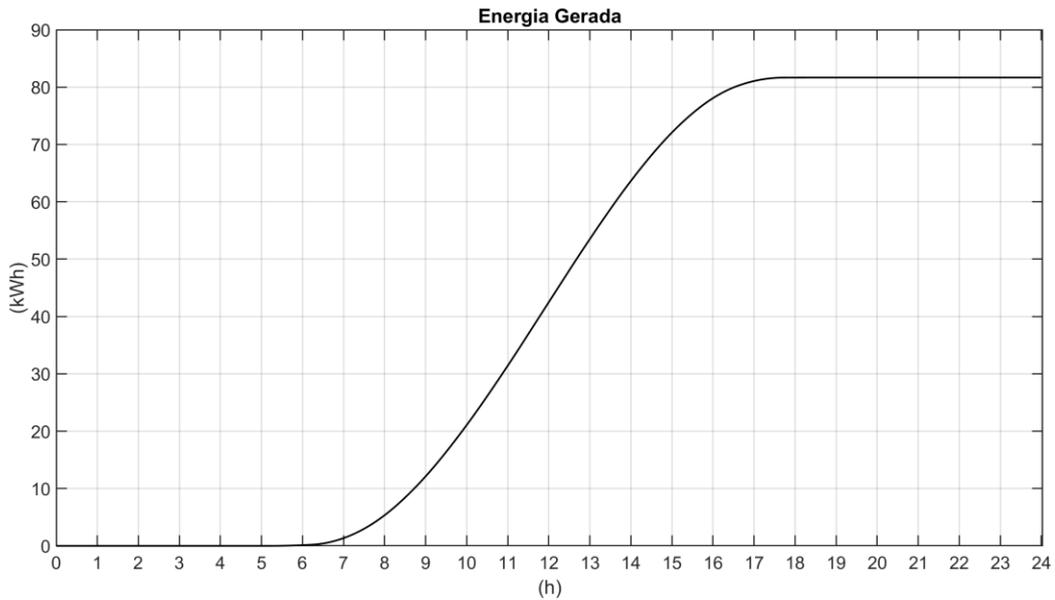


Figura 10: Energia total gerada diariamente.
Fonte: Autor.

Para um projeto adequado, não basta prover capacidade de potência para o atendimento instantâneo das cargas, mas, especial atenção deve ser dada ao balanço energético num ciclo diário. Ou seja, é fundamental gerar e armazenar energia excedente para viabilizar o atendimento nos intervalos de ausência de geração.

Para ilustrar o balanço energético, aplica-se instantaneamente a equação (3), resultando no gráfico apresentado na Figura 11. Conforme Figura 11, as derivadas negativas estão presentes nos intervalos em que a produção energética é inferior ao consumo de energia. Por outro lado, nos intervalos com derivadas positivas, a produção de energia supera a demanda energética, permitindo, inclusive, o acúmulo de energia excedente.

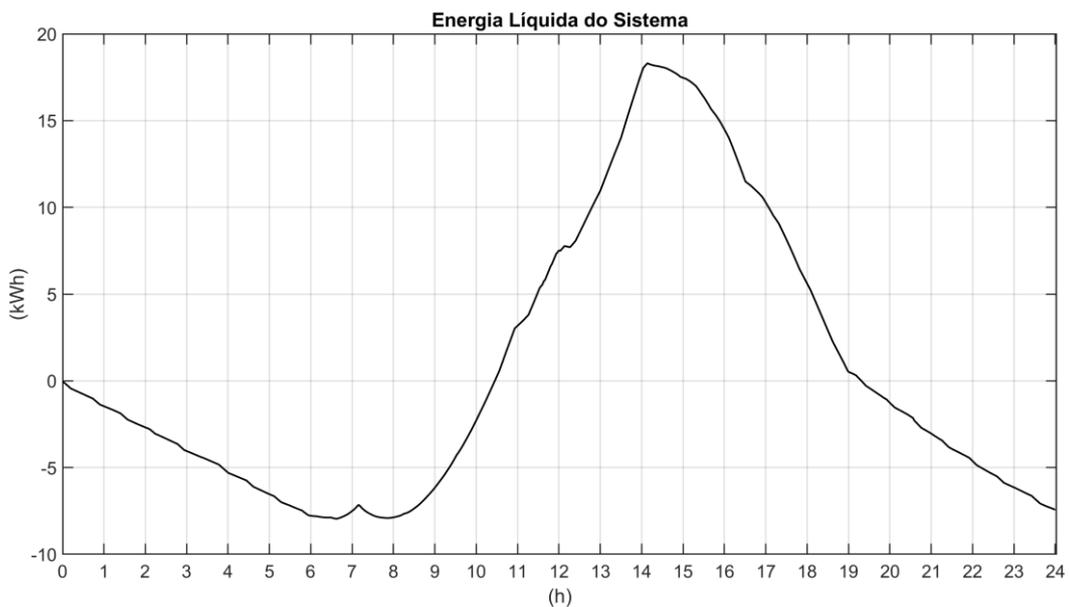
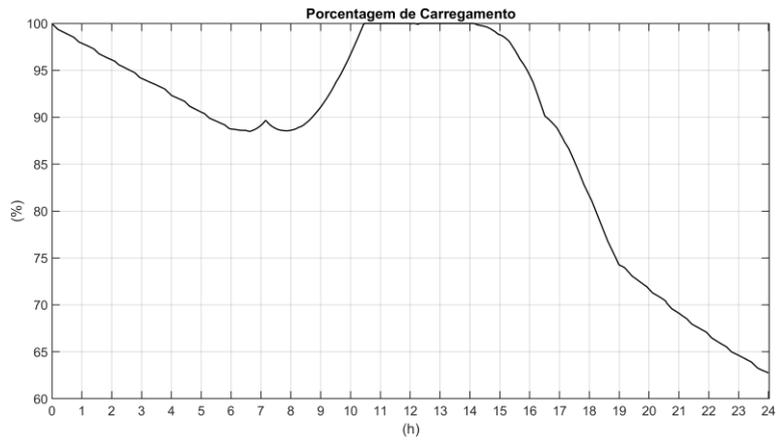


Figura 11: Balanço energético do sistema.
Fonte: Autor.

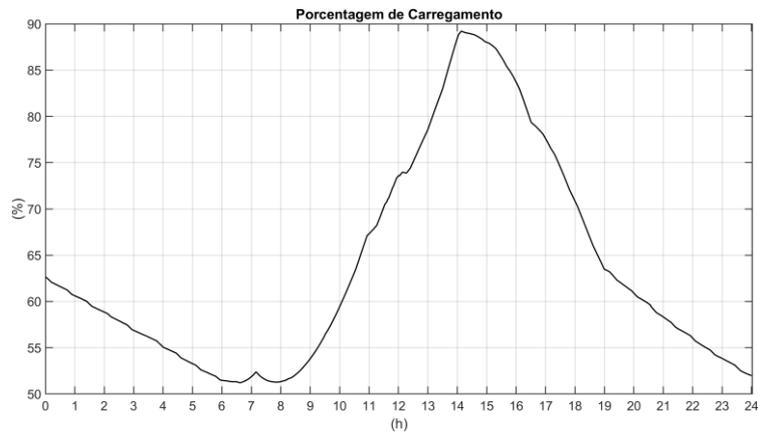
Para avaliar se o excedente energético identificado na Figura 11 é suficiente para atender à demanda durante os períodos de baixa ou nenhuma produção, simulou-se a operação do sistema partindo-se do banco de baterias existente completamente carregado. A análise se estendeu por dois ciclos diários completos.

Conforme ilustrado na Figura 12 (a), observa-se que o ciclo diário foi concluído restando pouco mais de 60% de carga nas baterias. O primeiro ciclo não é conclusivo, afinal, boa parte da energia gerada não foi armazenada pois o banco de baterias se manteve saturado. Contudo, a análise do segundo ciclo (Figura 12 (b)) deixa evidente que a energia consumida atualmente é superior a energia gerada, ou seja, ao longo dos dias, o banco tenderá a terminar e iniciar novos ciclos sempre sem carga alguma (Figura 13). No entanto, esse nível de carga se esgota quase completamente até as 00h do dia seguinte, indicando uma limitação na capacidade de armazenamento em atender plenamente à demanda noturna.

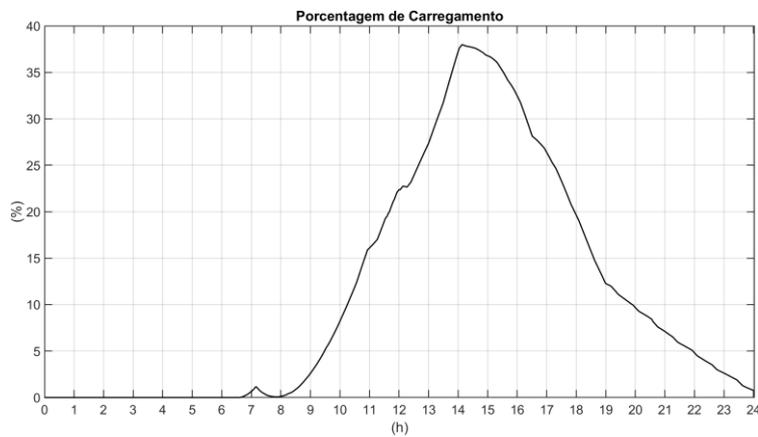
Os dados analisados destacam as limitações do sistema fotovoltaico atual da Escola Jatobazinho em atender integralmente à sua demanda energética. A avaliação demonstra que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, mesmo com o suporte do banco de baterias, é insuficiente para sustentar o consumo diário da escola de maneira contínua e autossuficiente. Consequentemente, o gerador a diesel, projetado para operar apenas em situações emergenciais, tem sido utilizado com frequência, o que resulta em um aumento significativo das emissões de gases poluentes e eleva os custos operacionais do sistema, comprometendo sua eficiência e sustentabilidade.



(a)



(b)



(c)

Figura 12: Percentual de carga das baterias ao longo do ciclo diário:
 (a) primeiro ciclo de operação; (b) segundo ciclo de operação; (c) tendência de operação.
Fonte: Autor.

RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma análise detalhada do desempenho do sistema fotovoltaico off-grid da Escola Jatobazinho em resposta a quatro cenários planejados, com o objetivo de garantir a sustentabilidade energética da instituição. Os cenários consideram, inclusive, a

possibilidade de aumento na carga energética conforme o planejamento da escola. A partir do cenário 2, as alterações realizadas no sistema original visam suprir integralmente as demandas energéticas do complexo escolar utilizando exclusivamente a energia gerada pela usina fotovoltaica. Os resultados obtidos fornecem informações essenciais para compreender tanto as limitações quanto as potencialidades do sistema, contribuindo para decisões mais assertivas no contexto energético da escola.

a. Cenário 1: aumento de carga

Conforme planejamento da escola, objetiva-se acrescentar 24 ventiladores com potência nominal de 300 W cada. Estima-se que metade dos ventiladores irá operar por 8 horas diárias durante as aulas e a outra metade atenderá os dormitórios, também por 8 horas, durante a noite. Sendo assim estima-se um aumento diário de energia de aproximadamente 57,6 kWh.

Para facilitar o ajuste da curva de demanda original e considerando que nem sempre os horários de uso dos ventiladores serão rigorosamente respeitados, optou-se por acrescentar à curva de demanda uma potência média de 2,4 kW ao longo das 24 horas. A curva de carga atual foi ajustada para incorporar essa ampliação, resultando em um deslocamento ascendente da curva original, como demonstrado na Figura 13.

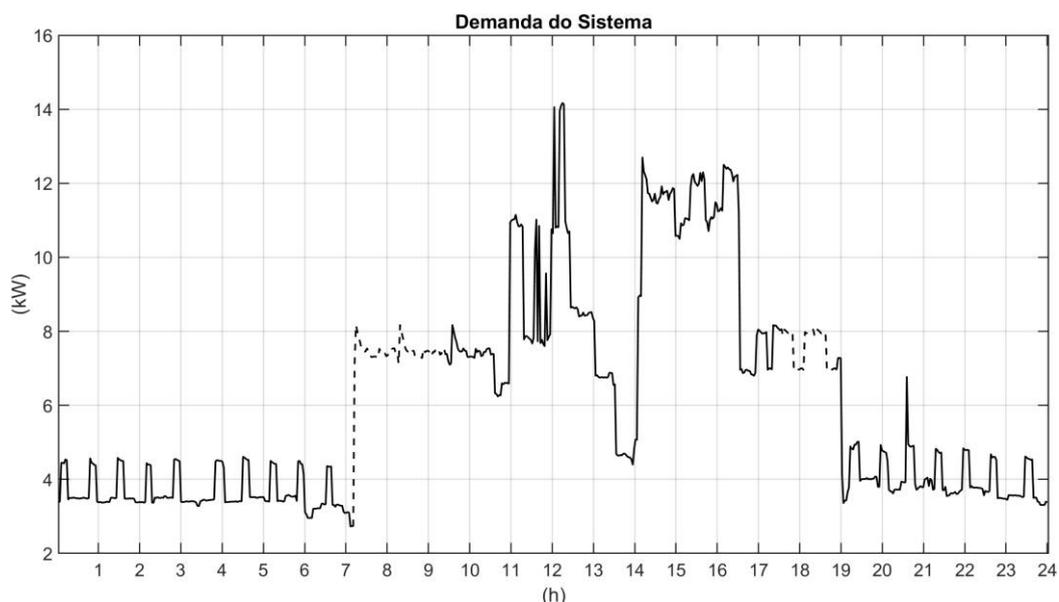


Figura 13: Curva de demanda para o cenário 1.

Fonte: Autor.

Com a inclusão dessa carga adicional, a demanda diária do sistema aumenta significativamente, atingindo 146,70 kWh, considerando o funcionamento contínuo dos ventiladores. Esse incremento representa um aumento substancial em comparação ao consumo

atual, que já ultrapassa a capacidade de geração da usina fotovoltaica. A Figura 14 apresenta, de forma gráfica, o consumo de energia ao longo do dia.

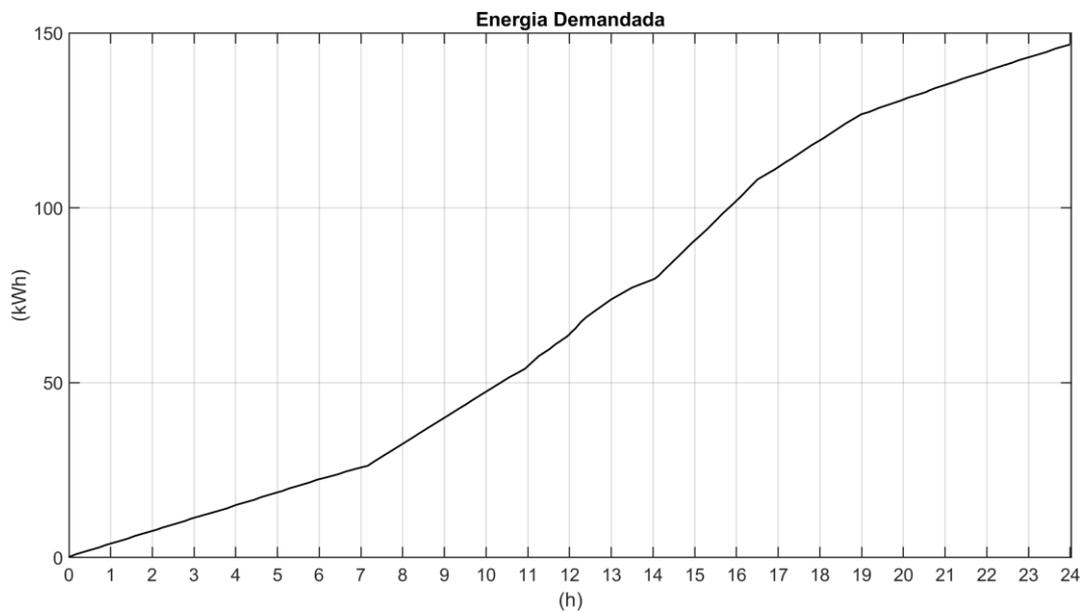


Figura 14: Perfil da energia demandada ao longo de um dia para o cenário 1.

Fonte: Autor.

Conforme ilustrado na Figura 15, a ampliação da carga intensifica ainda mais o desequilíbrio energético, que já era insuficiente para atender à demanda existente. Os trechos de derivadas positivas são insuficientes para garantir reposição energética mínima durante todo o período analisado. Este cenário só ressalta a necessidade urgente de aumentar a capacidade de geração para viabilizar a operação adequada do sistema.

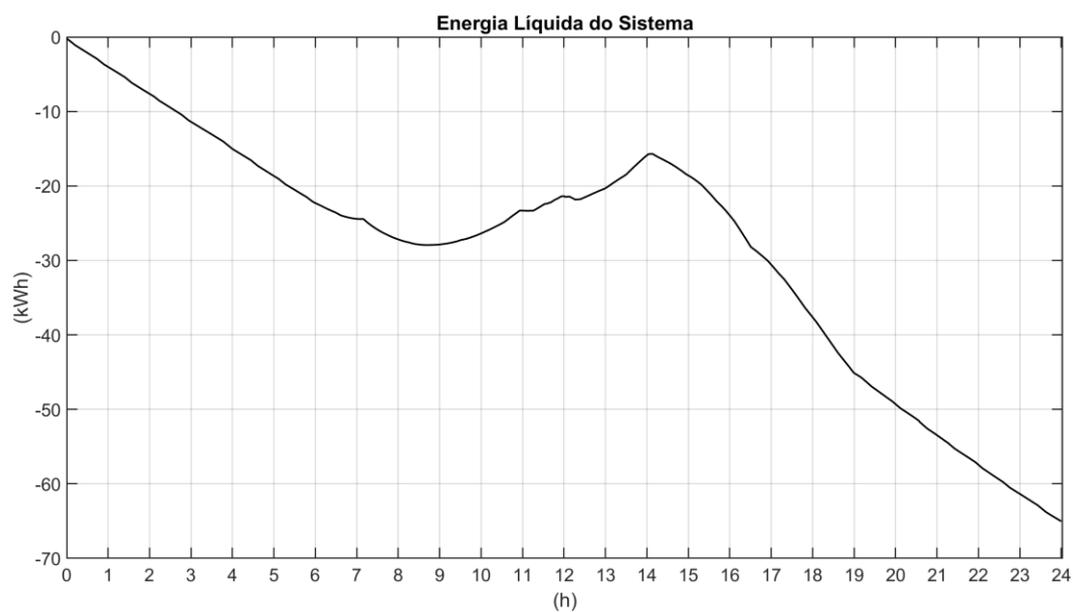
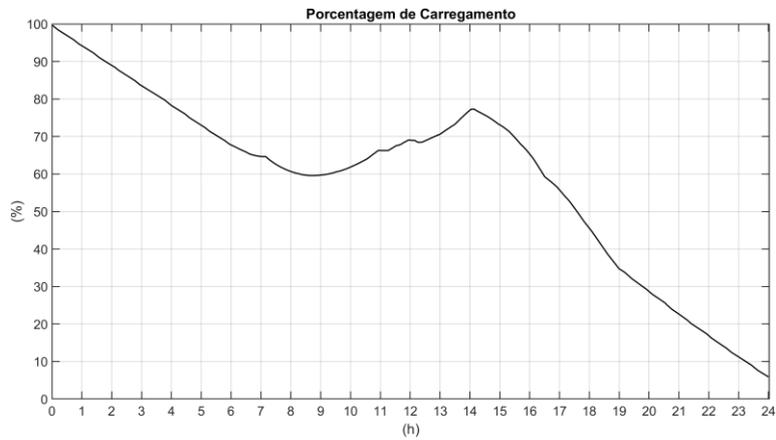


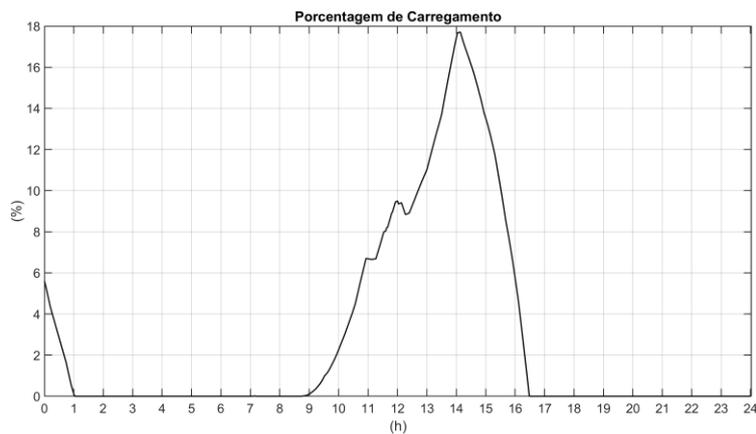
Figura 15: Balanço energético para o cenário 1.

Fonte: Autor.

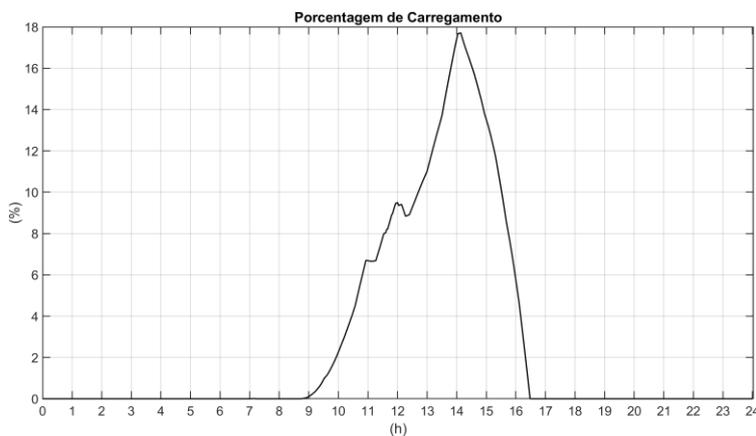
Conforme ilustrado na Figura 16 (a), a energia gerada pela usina é insuficiente para carregar adequadamente o banco de baterias. A partir do segundo ciclo, Figura 16 (b), o banco de baterias permanece a maior parte do tempo em estado crítico de carga. Esse comportamento não apenas compromete o desempenho do sistema, mas também acelera o desgaste do banco de baterias, reduzindo consideravelmente sua vida útil.



(a)



(b)



(c)

Figura 16: Perfil de carregamento do banco de baterias para o cenário 1: (a) primeiro ciclo de operação; (b) segundo ciclo de operação; (c) tendência da operação.

Fonte: Autor.

b. Cenário 2: acréscimo de painéis fotovoltaicos – inversores atuais

Com base nas necessidades identificadas, constatou-se que cada inversor instalado possui capacidade para a adição de mais dois módulos solares idênticos aos já existentes. Essa expansão eleva a capacidade instalada da usina fotovoltaica de 19,2 kWp para 24 kWp, utilizando 10 módulos de 400 Wp por inversor, mantendo inalterado o banco de baterias.

Esse aumento representa uma melhoria expressiva na capacidade de geração de energia solar. Para avaliar o impacto dessa expansão, a curva de geração média foi recalculada para o mês de junho, que apresenta a menor incidência solar ao longo do ano, conforme os dados do Atlas Solar Global da SOLARGIS. Com a adição dos novos módulos, o pico de potência gerada foi ampliado de 11,19 kW para 14 kW, como demonstrado na Figura 17.

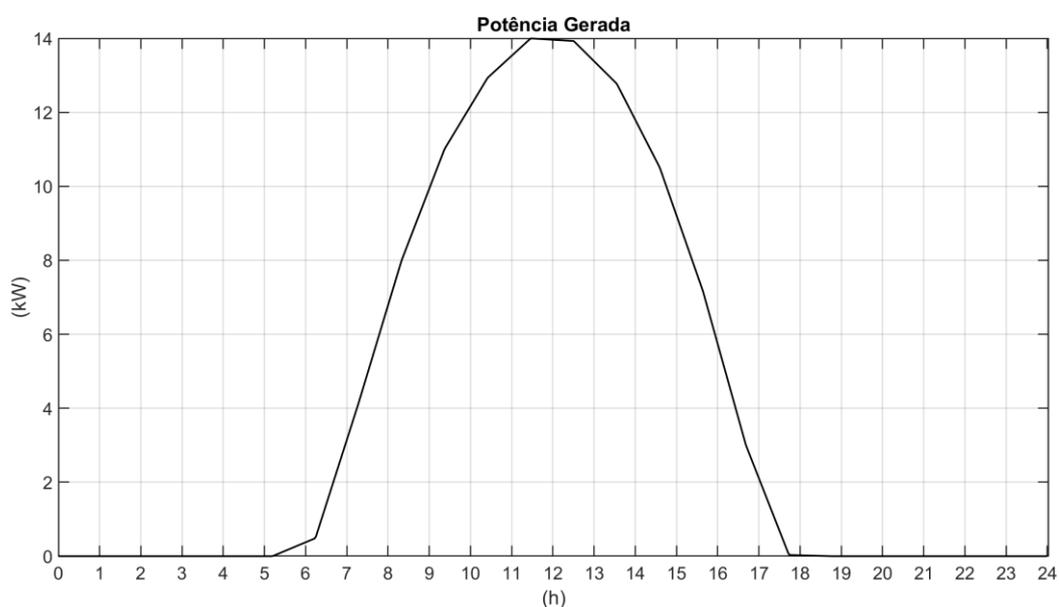
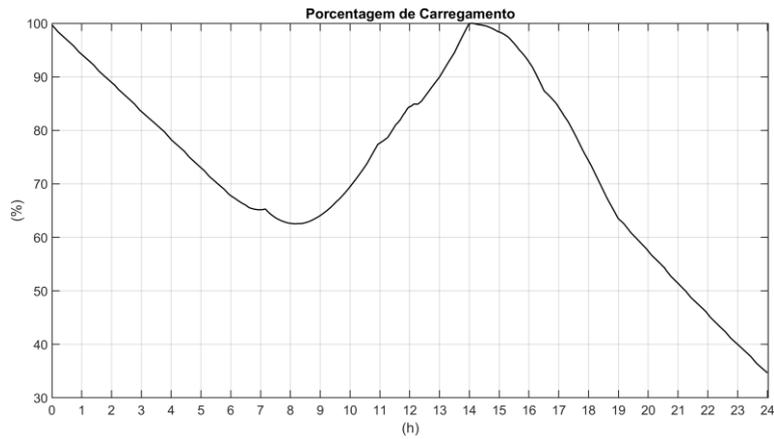


Figura 17: Curva de geração para cenário 2.

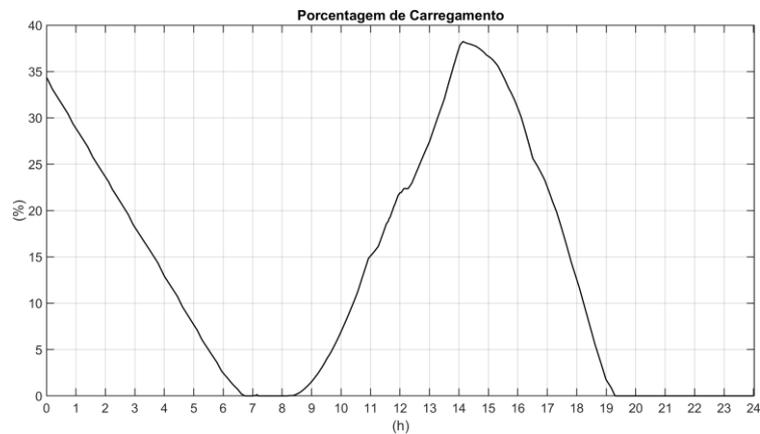
Fonte: Autor.

Esse aumento impacta positivamente a energia gerada diariamente, elevando-a de 81,67 kWh/dia para 102 kWh/dia. Apesar do avanço significativo, a geração ainda permanece insuficiente para atender à demanda total de 146,7 kWh/dia, conforme identificado no primeiro cenário.

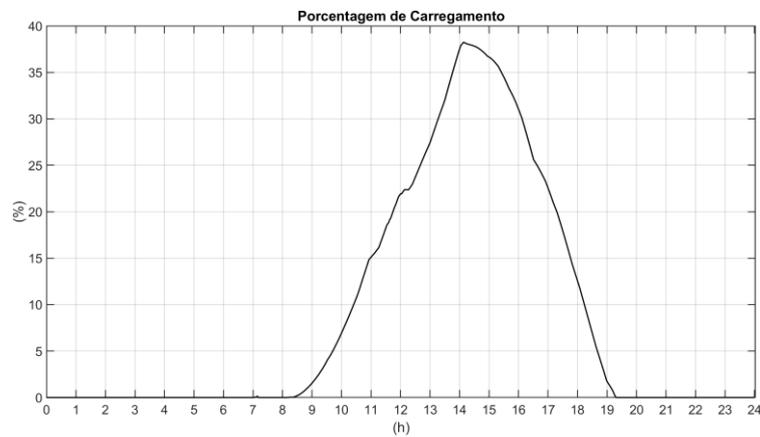
A Figura 18 ilustra o impacto da ampliação no perfil de carregamento do banco de baterias considerando. Para o primeiro ciclo (Figura 18 (a)), a simulação foi iniciada com o banco de baterias totalmente carregado. Nota-se que, durante o pico de insolação, há um aumento no nível de carga das baterias em comparação ao cenário anterior. Entretanto, o banco de baterias ainda apresenta uma profundidade de descarga elevada durante o período noturno, concluindo o ciclo com cerca de 35% de sua capacidade. A partir do segundo ciclo (Figura 18 (b)) o banco de baterias já terminará sem carga, levando à tendência apresentada na Figura 18 (c) para os demais dias de operação.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: Perfil de carregamento do banco de baterias para o cenário 2: (a) primeiro ciclo de operação; (b) segundo ciclo de operação; (c) tendência de operação.

Fonte: Autor.

Mesmo com a ampliação da capacidade instalada da usina para 24 kWp, o banco de baterias não atinge um estado de carga satisfatório ao final de cada ciclo diário, evidenciando que o aumento da geração, embora significativo, ainda não é suficiente para suprir completamente a demanda energética do complexo escolar. Diante disso, será realizado um novo aumento na capacidade da usina fotovoltaica, visando reduzir ainda mais a necessidade

de utilização de fontes complementares, como o gerador a diesel, para atender às demandas do sistema.

Essa condição ressalta a importância de estratégias adicionais, como a otimização do consumo energético e o aumento da eficiência do sistema de geração, para assegurar a autossuficiência energética. A expansão contínua da usina fotovoltaica representa um passo crucial para alcançar o equilíbrio energético desejado.

c. Cenário 3: *acréscimo de painéis fotovoltaicos - substituição dos inversores*

Com o objetivo de explorar alternativas para atender à demanda energética da Escola Jatobazinho, o terceiro cenário propõe a substituição dos inversores existentes por seis unidades do modelo SPF 5000 ES, cada uma com capacidade nominal de 5 kW. Essa atualização permite a ampliação do número de módulos solares para 90, mantendo o banco de baterias inalterado. Com essa nova configuração, a capacidade instalada da usina fotovoltaica é elevada para 36 kWp, representando um aumento expressivo na capacidade de geração de energia.

A curva de geração foi recalculada considerando o mês de junho, que apresenta a menor incidência solar ao longo do ano, e tomando como base os dados do Atlas Solar Global da SOLARGIS. Com os 90 módulos operando, o pico de geração fotovoltaica atinge 21 kW, proporcionando um aumento substancial na energia disponível para atender às demandas do complexo escolar, conforme ilustrado na Figura 19.

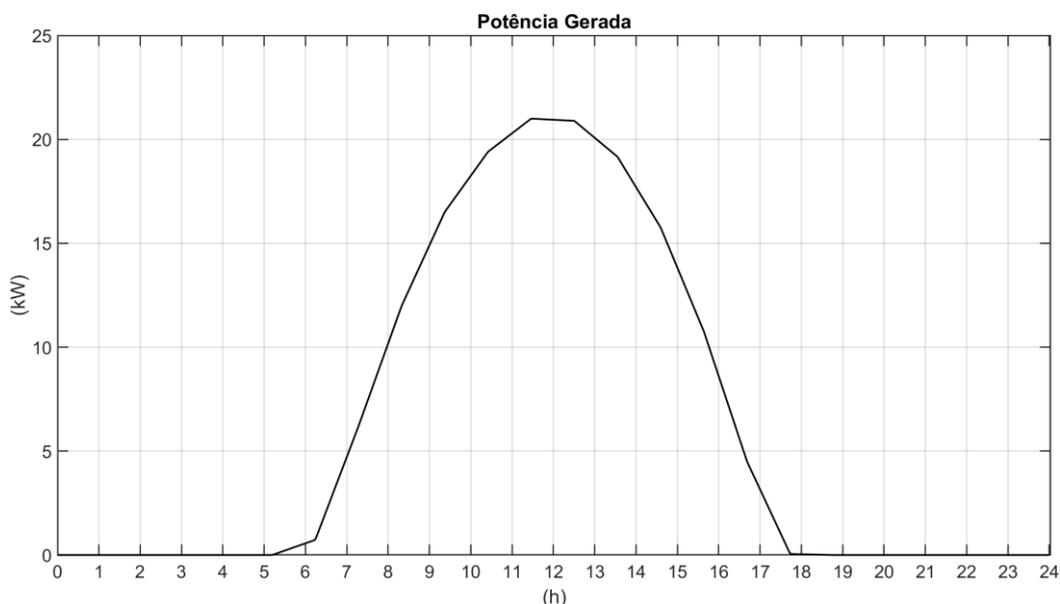


Figura 19: Curva de geração para o cenário 3.

Fonte: Autor.

A energia gerada diariamente atinge 153,13 kWh, superando pela primeira vez a demanda energética total de 146,7 kWh, marcando um avanço significativo em direção à autossuficiência.

A Figura 20 ilustra o balanço energético instantâneo. O comportamento da curva revela um período considerável de derivada positiva, onde a energia gerada recupera o déficit energético acumulado e ainda garante um excedente para armazenamento no banco de baterias.

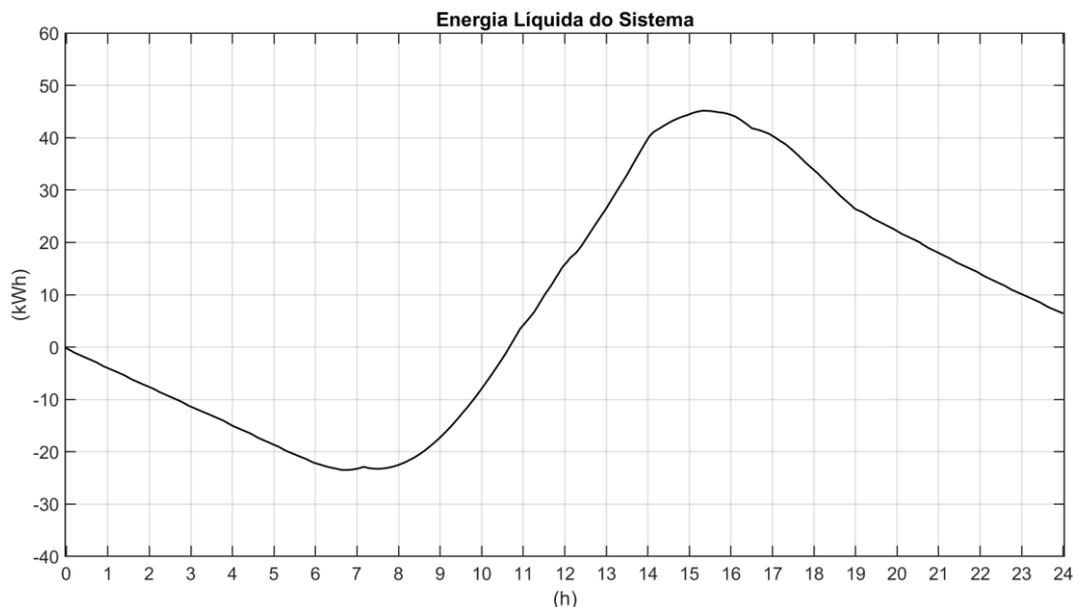


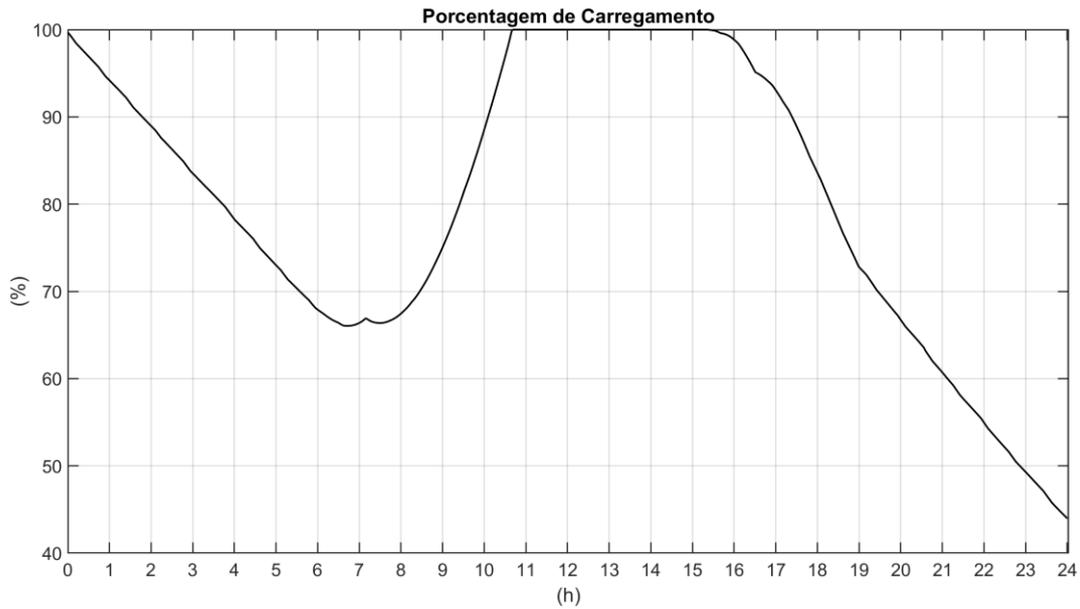
Figura 20: Balanço energético para o cenário 3.

Fonte: Autor.

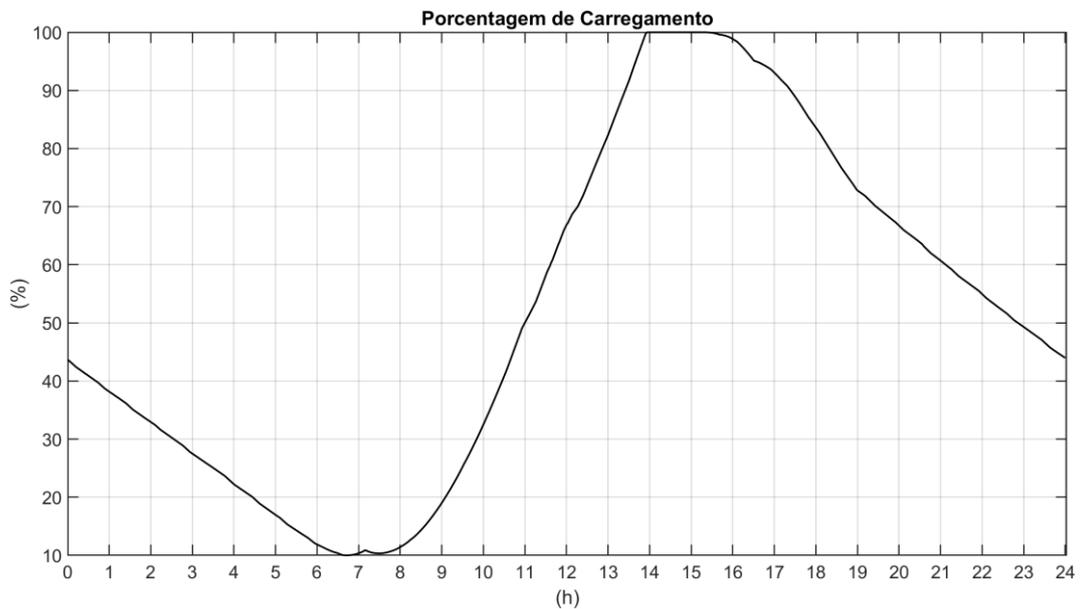
O impacto dessa ampliação no perfil de carregamento do banco de baterias é apresentado na Figura 21. Mantendo-se o padrão das simulações anteriores, no primeiro ciclo (Figura 21 (a)), o sistema é iniciado com o banco de baterias totalmente carregado. Ao final das primeiras 24 horas, o banco apresenta cerca de 45% de sua carga, o que, a princípio, parece representar um valor razoável para a continuidade da operação.

Partindo-se para o segundo ciclo (Figura 21 (b)), agora com carga inicial de 45%, observa-se que o banco de baterias atinge níveis críticos de carga a partir das 5h. Embora a carga total não seja zerada, trabalhar com valores próximos a 10% de carregamento pode impactar na vida útil das baterias. Contudo, apesar da profundidade do descarregamento, o sistema parece se demonstrar autossuficiente uma vez que, ao final do segundo ciclo, as baterias apresentam estado de carga ligeiramente superior ao inicial.

Embora a ampliação para 36 kWp represente um avanço significativo rumo à autossuficiência energética, a ausência de melhorias no banco de baterias limita o desempenho global do sistema. Para garantir uma operação confiável e eficiente do complexo escolar, será imprescindível implementar ajustes adicionais, como a substituição ou otimização do banco de baterias. Essas medidas serão abordadas no cenário seguinte, visando aprimorar a capacidade de armazenamento e fornecer estabilidade energética.



(a)



(b)

Figura 21 Perfil de carregamento do banco de baterias para o cenário 3.

(a) primeiro ciclo de operação; (b) segundo ciclo de operação.

Fonte: Autor.

d. Cenário 4: ampliação do banco de baterias

No quarto e último cenário, propõe-se aumentar a capacidade de armazenamento com a adição de duas células extras por inversor, idênticas às já existentes. Essa configuração, ilustrada na Figura 22, amplia significativamente a capacidade do banco de baterias em cada

fase, tornando o sistema mais robusto e preparado para atender à demanda energética durante os períodos noturnos e de baixa insolação.

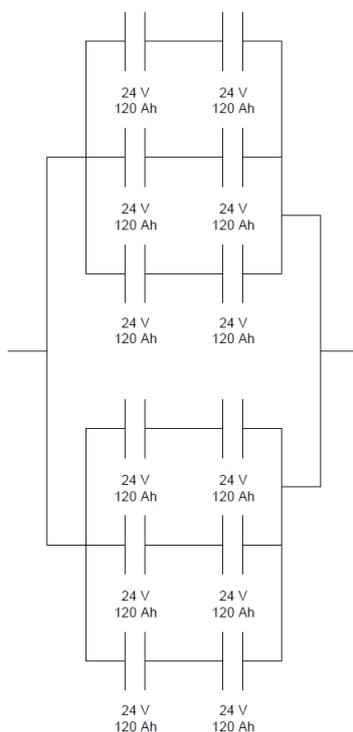


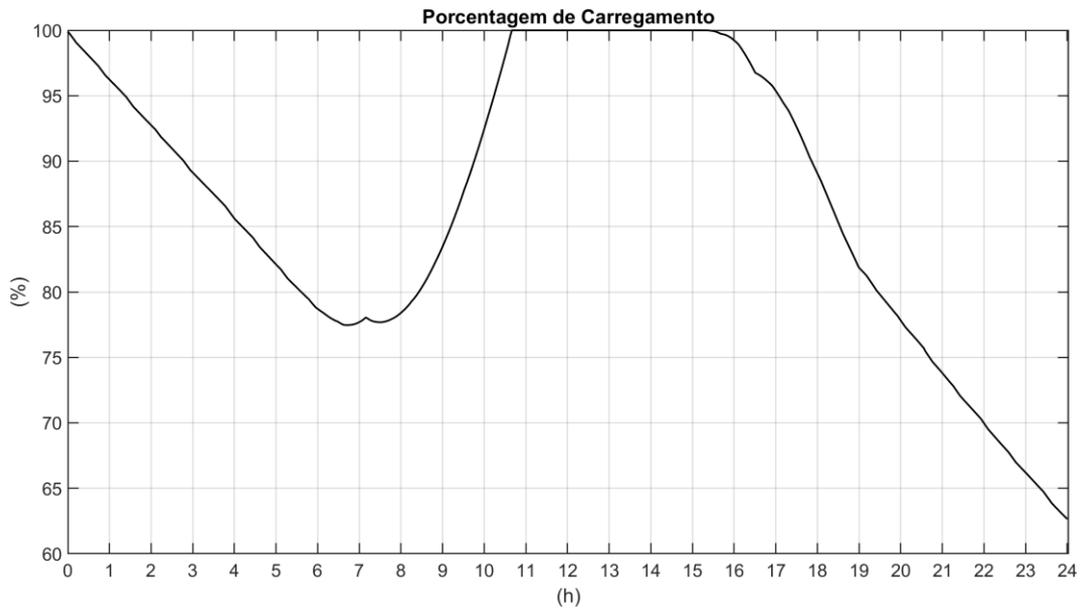
Figura 22: Banco de baterias ampliado.
Fonte: Autor.

Conforme ilustrado na Figura 23, o aumento da capacidade do banco de baterias mantém o nível de carga em patamares satisfatórios ao longo de todo o ciclo. Pela manhã, a profundidade de descarga é reduzida para no máximo 60%, contribuindo para a preservação da saúde das baterias. Ao final do ciclo diário, o banco retém cerca de 65% de sua carga total, proporcionando energia suficiente para o início do próximo ciclo até a ativação dos painéis solares. Essa configuração melhora a eficiência do sistema, reduz o desgaste das baterias e prolonga sua vida útil.

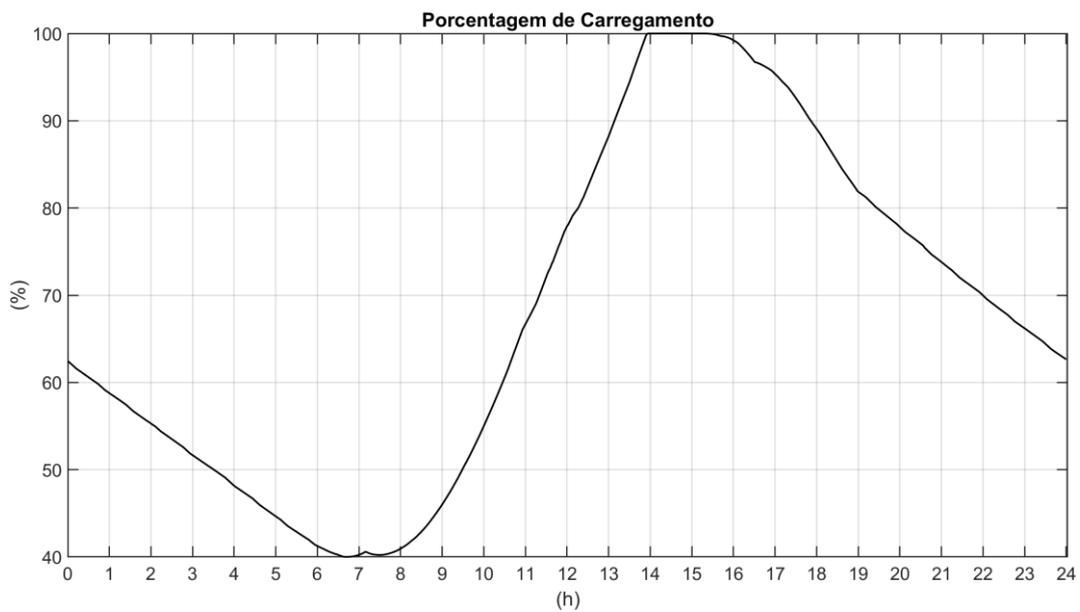
Com a adição de duas células extras por inversor, o banco de baterias adquire a capacidade necessária para acompanhar a expansão da geração fotovoltaica realizada no cenário anterior. Essa configuração elimina a dependência frequente de geradores a diesel, promovendo uma operação mais sustentável e alinhada com a autossuficiência energética do complexo escolar.

O cenário 4 demonstra que a ampliação simultânea da geração e do armazenamento é crucial para viabilizar um sistema completamente off-grid, proporcionando maior confiabilidade e eficiência na operação da Escola Jatobazinho. No cenário 3, o banco de baterias se estabiliza com 44% de carga para o início de cada ciclo, contudo, enfrentando uma profundidade de descarga bastante elevada ao longo da operação. Já no cenário 4, o banco de baterias tem seu estado de carga estabilizado em 62% e sua profundidade de descarga é reduzida

significativamente, chegando ao mínimo de 40% entre as 6h e 8h. Essa melhoria torna o cenário 4 a solução mais adequada para assegurar a sustentabilidade e a longevidade do sistema.



(a)



(b)

Figura 23: Perfil de carregamento do banco de baterias para o cenário 4: (a) primeiro ciclo de operação; (b) segundo ciclo de operação.

Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas, a ampliação para 36 kWp no cenário 3 representou um marco importante para a busca pela autossuficiência energética na Escola Jatobazinho, proporcionando uma geração de energia capaz de suprir a demanda total. Contudo, a limitação

na capacidade de armazenamento do banco de baterias restringiu a eficiência global do sistema, resultando em profundidade de descarga elevada e colocando em risco a durabilidade dos componentes.

No cenário 4, com a adição de duas células extras por inversor, foi possível superar essa limitação, permitindo que o banco de baterias inicie cada ciclo diário com um estado de carga de 62%, muito superior aos 44% observados no cenário anterior. Essa configuração não apenas reduz a profundidade de descarga para níveis mais seguros, mas também aumenta a eficiência e a confiabilidade do sistema, eliminando a necessidade de fontes complementares como geradores a diesel.

Os resultados destacam que intervenções isoladas, como o aumento da geração ou o armazenamento, não são suficientes para garantir a autossuficiência em sistemas off-grid. A combinação de ambas as estratégias no cenário 4 demonstrou ser a abordagem mais eficaz para atender às necessidades energéticas de maneira sustentável e confiável, assegurando a continuidade das operações do complexo escolar mesmo em condições adversas de insolação. Como perspectiva futura, recomenda-se explorar soluções inovadoras, como a implementação de sistemas off-grid distribuídos, que podem aumentar a resiliência energética, além de avaliar a integração de tecnologias mais avançadas, como baterias de maior eficiência. Adicionalmente, sugere-se o aprofundamento no estudo do desgaste das baterias em condições de operação intensiva, considerando diferentes perfis de carga e profundidades de descarga, para otimizar sua durabilidade e reduzir custos operacionais.

A análise apresentada não apenas reforça a importância de sistemas bem dimensionados, mas também contribui para o avanço das práticas de sustentabilidade em regiões remotas e sensíveis, como o Pantanal Sul-Mato-Grossense.

REFERÊNCIAS

Asian Development Bank. (2018). Handbook on Battery Energy Storage System. Recuperado em 05 de dezembro de 2024, de <https://www.adb.org/publications/handbook-battery-energy-storage-system>.

Akinsipe, O. C., Moya, D., & Kaparaju, P. (2021). Design and economic analysis of off-grid solar PV system in Jos-Nigeria. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 125055. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125055.

D. Frame, K. Tembo, M. J. Dolan, S. M. Strachan and G. W. Ault. (2011). A community based approach for sustainable off-grid PV systems in developing countries. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, pp. 1-7. doi: 10.1109/PES.2011.6039593.

Global Solar Atlas. (n.d.). Global Solar Atlas: Free access to solar resource data for the world. Recuperado em 19 de novembro de 2024, de <https://globalsolaratlas.info>.

M. Khatami, H. Mortazavi, M. R. Mashhadi and M. Oloomi. (2013). Designing an off-grid PV system: For a residential consumer in Mashhad-Iran. 2013 Africon, Pointe aux Piments, Mauritius, pp. 1-5. doi: 10.1109/AFRCON.2013.6757680.

S. Jogunuri, R. Kumar and D. Kumar. (2017). Sizing an off-grid photovoltaic system (A case study). 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India, pp. 2618-2622. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389927.

Y. Hassan, M. Orabi, M. Ismeil and A. Alshreef. (2019). Optimum Off-Grid PV System Sizing Case of Study: Aswan Egypt. 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, pp. 1015-1019. doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008187.